

Calidad Edáfica en Dos Toposecuencias del Eje Neovolcánico Mejicano

Silvia Pajares¹, Sara Covalada¹, Juan F. Gallardo¹, Jorge D. Etchevers² y Christian Prat³

¹C. S. I. C., Aptado. 257, Salamanca 37071 (España).

²Colegio de Postgraduado, Campus Montecillo, Texcoco 56230 (Méjico).

³I.R.D./CENAPROS, Morelia 58090 (Michoacán, Méjico).

Resumen. En el presente Trabajo se estudian dos toposecuencias del altiplano mejicano, ubicadas sobre suelos de origen volcánico. La primera se localiza en el volcán del Tláloc (Estado de México, 19° 27' N; 98° 46' O) soportando las asociaciones forestales de pino-encino (PE), pastizal (PZ), reforestación de pino (RP), *tepetate* desnudo (TD) y vegetación halófito (LT), que se sitúan a 3000, 2950, 2700, 2650 y 2220 m. s.n.m., respectivamente. La catena de suelos está constituida por Andosoles (PE y PZ), *tepetates* (PR y TD) y sedimentos del ex-lago de Texcoco, actualmente desecado (LT). La segunda se sitúa en Atécuaro (Estado de Michoacán: 19° 34' N; 101° 10' O); la sucesión forestal es pino-encino en la cumbre (2600 m s.n.m.), con degradación creciente en la ladera, hasta llegar a cultivos en el pie de monte (2350 m s.n.m.). Los suelos son *Andosoles* en las partes más altas y *Oxisoles* en las más bajas. Durante 2004 se realizaron muestreos de suelos con el fin de determinar diversos parámetros edáficos físicos, químicos y bioquímicos relacionados con las funciones del suelo: 1) estructura edáfica y resistencia a la degradación; 2) permeabilidad y regulación de flujos de agua; 3) capacidad de amortiguación; 4) ciclo de nutrientes; y 5) productividad y biodiversidad. Los indicadores preseleccionados fueron densidad aparente, distribución de los agregados del suelo, pH (H₂O), CIC, PSB, contenido de COS., N, C/N, P asimilable, respiración microbiana y distribución del COS por tamaños de agregados. Los cultivos de Atécuaro y el *tepetate* del Tláloc tuvieron los valores más bajos en todos los indicadores; por otro lado, los mayores valores de éstos se concentraron en las partes altas de las toposecuencias, donde la cobertura vegetal es más densa y menos intervenida.

Palabras claves: Actividad microbiana, ciclo de nutrientes, indicadores, catena.

Introducción

La “calidad del suelo” ha sido definida como la capacidad que tiene éste para funcionar adecuadamente dentro de un ecosistema; es decir, proporcionar ciertos servicios a las plantas, los animales y el ambiente, de acuerdo a su uso específico o multifuncional (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997). Cada función del suelo integra, o es el resultado, de la interacción de las diversas propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuáles, son susceptibles de ser empleadas como indicadores de calidad, siempre que puedan ser medidas cualitativa o cuantitativamente y den idea sobre que tan adecuadamente funciona el suelo (S.Q.I., 1996).

De acuerdo con Hunnemayer *et al.* (1997) los indicadores de calidad edáfica permitirían: a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto a su sostenibilidad como medio productivo o recurso natural importante para la calidad de vida o el mantenimiento de la biodiversidad; b) analizar los posibles impactos antes de una intervención; c) evaluar el impacto de las intervenciones; y d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Los suelos tienen distintos niveles de calidad que están definidos básicamente por las características naturales o inherentes relacionadas con los factores formadores del suelo, los cambios dinámicos inducidos por el manejo (Singer y Ewing, 2000) y, también, por procesos de degradación. Detectar variaciones en el componente dinámico de la calidad edáfica es esencial para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de manejo del suelo y la gravedad de los procesos de degradación.

La conservación de la calidad de suelos es particularmente importante en ecosistemas marginales y frágiles, donde la presión humana excesiva ha llevado irreversiblemente a la

degradación y desertización de los suelos (Pérez-Trejo, 1994), como suele ser frecuente en los trópicos. Por consiguiente, el estudio de biomarcadores sensibles a la degradación de las tierras es de gran importancia, sobre todo en países donde la degradación edáfica es tema crucial para sus niveles de vida.

Tanto en el valle de México (Edo. México) como en la microcuenca de Atécuaro (Edo. Michoacán) la calidad edáfica se encuentra amenazada por el cambio que actualmente se está dando en el uso del suelo en muchas áreas rurales empobrecidas de Méjico: Abandono de campos de cultivo y tala de bosques, como fuente alternativa de ingresos a la agricultura, del tal forma que la deforestación está provocando una disminución de la cobertura vegetal y un aumento de la superficie del suelo afectada por fenómenos erosivos.

Diversos autores (Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994; Doran *et al.*, 1996; Karlen *et al.*, 2001; Astier *et al.*; 2002; Moffat, 2003; Vergara, 2003) han elaborado listas o propuestas de propiedades químicas, físicas y biológicas que consideraron útiles como indicadores edáficos en un amplio rango de situaciones socioeconómicas y ecológicas para valorar la calidad de los suelos. Del amplio elenco de indicadores considerados por estos autores, y en base a experiencias previas, se han seleccionado los mencionados en la Tabla 1 con el fin de conseguir información acerca de la salud de todas las funciones del suelo.

De entre esos parámetros el posiblemente más utilizado ha sido la materia orgánica del suelo (MOS), pero su calidad y/o cantidad suele cambiar lentamente (se requiere varios años para apreciar los cambios resultantes de una perturbación), por lo que a veces es demasiado tarde para actuar cuando los síntomas se hacen evidentes; por tanto, se requieren indicadores más sensibles a los cambios y rápidos de detectar. Las propiedades biológicas del suelo pueden ser potencialmente buenos indicadores por su sensibilidad y característico tiempo rápido de respuesta.

El **objetivo** del presente Trabajo fue analizar ciertas características físicas, químicas y biológicas, en dos toposecuencias de vocación forestal, de suelos volcánicos que soportan diversos tipos de vegetación y sometidos a diversos procesos degradativos, con ubicaciones diferentes dentro del eje Neovolcánico mejicano, con el propósito de encontrar entre éstas indicadores edáficos de cambio temprano.

Tabla 1 - Parámetros físicos, químicos y bioquímicos seleccionados en el presente trabajo y su relación con las funciones del suelo

Funciones del suelo	Indicadores		
	Físicos	Fisicoquímicos y Químicos	Biológicos
Estructura edáfica y resistencia a la degradación	Densidad aparente	COS	
Permeabilidad y regulación de flujos de agua	Densidad aparente	COS	
Capacidad de amortiguación	Densidad aparente	COS, CIC	
Ciclo de nutrientes		pH, PSB, CIC, COS, C/N, distribución del COS en agregados, P asimilable	Materia orgánica macroscópica, Respiración microbiana
Biodiversidad y productividad		pH, PSB, COS, C/N, P asimilable	Materia orgánica macroscópica, Respiración microbiana

Materiales y métodos

Zonas de estudio

Este estudio se llevó a cabo en dos toposecuencias de suelos de origen volcánico ubicadas en el eje Neovolcánico mejicano. La primera se localiza en Tlálloc (Estado de México, 19°27'N; 98°46'O) soportando las asociaciones forestales de pino-encino (PE), pastizal culminal (PC), reforestación de pino (PR), tepetate desnudo (TD), cuyo concepto ha sido descrito por Etchevers *et al.* (2004), y vegetación halófito del ex-lago de Texcoco (LT), situándose a 3000, 2950, 2700, 2650 y 2220 m s.n.m., respectivamente. En cada uno de estos puntos sistemas de vegetación se tomaron muestras de suelo. Los suelos son *Andosoles* (PE y PZ), *tepetates* (PR y TD) y sedimentos del ex-lago Texcoco desecado (LT). El clima es templado subhúmedo, con lluvias en verano, las temperaturas medias anuales fluctúan entre 12 y 18 °C y la precipitación media anual oscila entre 700 y 1000 mm a⁻¹.

La segunda toposecuencia se sitúa en Atécuaro (Estado de Michoacán: 19°34'N; 101°10'O); la sucesión forestal es pino-encino en la cumbre, con degradación creciente en la ladera, hasta llegar a cultivos en el pie de monte; los suelos son *Andosoles* en las partes más altas (2600 m s.n.m.) y *Oxisoles* en las más bajas (2350 m s.n.m.). Se tomaron muestras en cinco puntos a lo largo de la toposecuencia: Bosque degradado (*Oxisoles*; BO), Cultivo (*Andosoles*; CA), Zona quemada (*Andosoles*; QA), Bosque degradado (*Andosoles*; BD) y Bosque no alterado (*Andosoles*; BA). El clima es templado subhúmedo con lluvias estivales y una temperatura media anual que oscila entre 15.7 y 17.7°C; la precipitación media anual es del orden de 750 a 1100 mm a⁻¹.

Muestras de suelo

En los cinco lugares de muestreo de cada toposecuencia se recolectó 10 submuestras para elaborar una muestra compuesta. Las muestras se tomaron con una barrena cilíndrica a una profundidad de 0-15 cm en la toposecuencia del Tlálloc y 0-10 cm en la de Atécuaro (por ser las profundidades más sensibles a los cambios).

Las muestras de suelo fueron secadas al aire y homogeneizadas; se separó la materia orgánica macroscópica del suelo mineral por extracción manual y, posteriormente, se tamizó las muestras de suelo mineral a malla 2 mm.

Análisis físicos y físico-químicos

La densidad aparente (Da) se midió por el método de los cilindros; el pH se midió en pHmetro usando relación suelo:agua 1:2; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases intercambiables mediante el método del acetato amónico 1 N a pH 7.0 (Ca y Mg fueron determinados por espectroscopia de absorción atómica y K y Na por fotometría en llama).

Análisis químicos y bioquímicos

El C orgánico del suelo (COS) fue determinado por combustión seca (TOCA), el N total (Nt) mediante un autoanalizador Bran-Luebbe AA3 (fotómetro de flujo segmentado) y el P asimilable (Bray) según Bray y Kurt (1945) modificado.

Para la distribución del COS en los agregados del suelo, se fraccionaron físicamente las muestras de suelo (<2 mm) pasándolas, en seco, a través de tamices de 0.2 y 0.05 mm, resultando tres fracciones de agregados (muy gruesos, gruesos y finos). En cada fracción se determinó el C por combustión seca mediante un Carmhograph.

Para la medida de la respiración basal las muestras de suelo fueron ajustadas al 55 % de humedad de capacidad de campo. Se colocaron tres porciones de cada muestra, de 50 g cada una, en frascos de 250 mL con cierre hermético y se incubaron por 3 días a 25 °C en la oscuridad. La producción de CO₂, después de tres días, fue medida atrapándolo en 25 mL de NaOH 0.05 N y titulando el exceso de NaOH con HCl 0.05 N.

Resultados

Los resultados se exponen en las tablas 2 y 3. Las abreviaturas utilizadas se indican en las mismas tablas. En la catena de suelos de Tlálloc el punto más bajo es LT a 2,200 m y el más alto PE a 3,000 m; en la de Atécuaro el punto más bajo es BO a 2,350 m y el más alto BA a 2,600 m.

Discusión

Catena de Tlálloc (Tabla 2)

Los valores de pH de las zonas de estudio variaron de ligeramente ácido en el PZ y el PE a básico en el TD y alcalino en el LT, que son los dos lugares que muestran un mayor grado de degradación

La Da informa sobre la compactación que pueda existir en el suelo y también permite inferir sobre la circulación del agua, en el sentido que valores bajos ocasionan propiedades edáficas más favorables. El TD y el LT son los que poseen una mayor Da (mayor de 1.20 g cm⁻³), que determina que sean compactos y tengan problemas de circulación de agua y aire. En cambio, el PZ y el PE presentan una Da buena, por ser menor de 1.0 g cm⁻³, por consiguiente, estos suelos tendrán una porosidad más elevada que los anteriores.

Los valores de CIC pudieran estar subestimados en el LT porque se trata de suelos con altas concentraciones de sales y es sabido que el método empleado subestima la CIC en estas condiciones. Los contenidos en PSB son elevados en el LT y ello puede llegar a producir efectos desfavorables sobre la estructura del suelo.

En cuanto al P asimilable, los valores más bajos se obtuvieron para el TD, en cuyos primeros centímetros la disponibilidad de P asimilable para las plantas es baja (4.1 mg kg⁻¹). El RP presenta valores ligeramente bajos y el PE valores moderados. Los mayores valores se dan en el TL y el PZ.

Los sitios no perturbados de este estudio mostraron porcentajes de COS y Nt más altos que los más degradados. Según Mabuhay *et al.* (2004) la aireación superficial de suelo puede provocar una reducción de MOS y un aumento de pH. En general, los niveles de COS de estos suelos son bajos en comparación con los *Andosoles* de Chile y Japón (Zunino, 1982; Murata *et al.*, 1998), lo que indica que el origen de los primeros son depósitos volcánicos más recientes o que las condiciones climáticas del Eje Neovolcánico no son tan favorables para la producción primaria. Adicionalmente, LT, TD y RP mostraron deficiencias en N y esto puede limitar el crecimiento de las plantas, como queda patente en la ausencia de vegetación en el TD, en la poca abundancia de ella en el RP y la exclusiva presencia de vegetación halófito en el LT.

La relación C/N de la MOS es también un importante indicador de la calidad del suelo (Bauder, 1999). La relación C/N mostró valores de 8.0 a 17.3. El valor más bajo se dio en el TD debido a una mayor mineralización del C respecto al N (Santa Regina *et al.*, 1997); aún así, los valores de estos dos parámetros son muy bajos en comparación con los otros puntos de la catena. En PE, la relación C/N es bastante alta, debido a la elevada acumulación de compuestos orgánicos en este suelo y, aunque la concentración de COS es proporcionalmente mayor que la de Nt, el aspecto arbóreo no parece indicar carencia nitrogenada.

La distribución del C orgánico en los agregados muestra que el C mayormente se reparte entre los agregados gruesos y finos dada la escasez de agregados medios en todos los puntos de

muestreo, excepto en el PR; este suelo, al contrario que los demás, es netamente arcilloso, lo que origina que tenga menos agregados finos por su facilidad de agregación; consecuentemente, PR concentra más del 65 % de C en los agregados gruesos.

Según Wang *et al.*, (2003) la disponibilidad de sustrato (en este caso COS) es el principal determinante de la respiración del suelo. La degradación de los suelos (en este caso la erosión, que origina la aparición del TD) produce un decrecimiento significativo de la actividad microbiana del suelo, que queda evidenciado por la escasa respiración basal. En cambio, las zonas mejor conservadas (PZ y PE) muestran los mayores índices de actividad microbiana.

El estudio en conjunto sugiere que la erosión reduce marcadamente la actividad microbiana, tanto por un decrecimiento significativo del COS y Nt (y, con ello, otros nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas). Esto se manifiesta por la ausencia de vegetación en el área de los TD, como por la reducida capacidad de almacenamiento hídrico.

Por el contrario, los suelos de PC y PE están densamente cubiertos por vegetación autóctona de la zona. De este modo, el suministro de nutrientes provenientes de la mineralización primaria de la hojarasca a corto plazo (y también de la mineralización secundaria de la MOS; según Gallardo, 2000) va parejo a una significativa actividad microbiana en estos lugares.

Tabla 2 - Propiedades de los suelos de la catena de Tlálloc

INDICADORES EDAFICOS	LAGO (LT)	TEPETATE (TD)	PINO (PR)	ZACATE (PC)	PINO+ENCINO (PE)
Dens. aparente (g/cm³)	1.2	1.4	1.0	0.9	0.7
Agregados > 0.2 mm (%)	52.1	66.9	65.4	47.0	48.7
Agregados 0.2-0.05 (%)	0	4.2	15.1	13.6	13.2
Agregados < 0.05 (%)	47.9	28.9	19.4	39.4	38.1
pH H₂O (1:2)	9.1	7.6	6.7	5.0	6.3
CIC (cmoles/kg)	26.5	21.0	27.9	25.1	33.7
PSB (%)	142.6	96.1	80.8	62.0	75.6
COS (mg/g)	10.1	0.8	9.0	32.7	56.2
N total (mg/g)	0.53	0.10	0.52	2.2	3.3
C/N	16.4	8.0	17.3	14.1	16.6
P Bray (mg/Kg)	11.7	4.1	4.7	8.9	11.2
C agreg gruesos (%)	52.5	47.4	66.1	45.1	50.1
C agreg medios (%)	0	5.0	15.0	10.4	9.9
C agreg finos (%)	47.5	47.7	18.9	44.5	39.9
Respiración (mg CO₂/g suelo d)	0.19	0.12	0.32	0.42	0.46

Catena de Atécuaro (Tabla 3)

Todo el área a lo largo de la toposecuencia (salvo su inicio culminal, BA) está afectada por una deforestación más o menos intensa, lo que trae asociado la pérdida de la cobertura vegetal y, por ende, un incremento del riesgo de erosión. La tasa aproximada de deforestación anual en la microcuenca de Atécuaro entre 1962 y 1994 fueron de 15 ha a⁻¹ (Rubio, 1998), considerando tanto la disminución de la superficie forestal como la superficie de bosque que sufrió aclareos. En toda el área cubierta por vegetación arbórea el suelo se encuentra protegido contra la degradación erosiva por la existencia de una capa continua de hojarasca (horizonte O) y por los

relativos altos contenidos de MOS, que contribuyen a la formación y estructuración de agregados.

Los valores de D_a , analizada en campo en época seca, fueron, superiores a 1.0 g cm^{-3} en BD (1.08 g cm^{-3}), CA (1.08 g cm^{-3}) y BO (1.46 g cm^{-3}); el dato más bajo encontrado fue en BA (0.48 g cm^{-3}). Los suelos con propiedades ándicas tienen generalmente valores de D_a bajos, atribuidos al desarrollo de una estructura altamente porosa (Nanzzyo *et al.*, 1993b).

El pH (en H_2O) presenta valores ácidos, sobre todo en los *Andosoles*. Destaca el menor pH que presenta BD (5.4) y sobre todo CA (5.1) en relación a BA (5.6), lo que podría señalar que la degradación del bosque conduce a una acidificación en el suelo (Covaleda, *et al.*, 2004)

La CIC media fue $41.7 \text{ cmol kg}^{-1}$, llegando a $23.9 \text{ cmol kg}^{-1}$ en el BD, tal vez como consecuencia de la mayor actividad desforestadora que se observa en el área; la apertura de vías de saca de forma indiscriminada provoca compactación del suelo, mientras que la remoción de la capa superficial de materia orgánica impide la incorporación de nutrientes al suelo, incidiendo negativamente ambas causas sobre el ciclo nutricional. El PSB supera el 50 % tan solo en BA (52.3 %) y BO (54.7 %), y no se rebasa en el resto de los puntos. El P asimilable tan sólo se encontró a niveles de trazas en todos los casos, como es habitual en los suelos con propiedades ándicas, salvo en el cultivo, probablemente por la adición de fertilizantes fosfatados.

La acumulación de MOS es importante, en general, a lo largo de la toposecuencia, aunque en BA se dan los máximos tanto de COS como de Nt (160 y 6.5 mg g^{-1} respectivamente). Cuando el bosque se degrada, los contenidos de MOS disminuyen, tanto tras un proceso de deforestación paulatina, como en BD (64.3 y 2.5 mg g^{-1}), o tras sufrir un evento de incendio, como en QA (72.2 y 3.2 mg g^{-1}) o, sobre todo, por la puesta en cultivo del terreno, como en CA (53.2 y 3.5 mg g^{-1}). En BO, los contenidos de COS y Nt (95.1 y 4.6 mg g^{-1}) son superiores a los de BD, lo que hace pensar que el *Andosol* es más susceptible a la degradación que el *Oxisol*.

La relación C/N media (21.8) es bastante alta, lo que indica una mineralización lenta de la hojarasca, tal como pone de manifiesto la presencia de un horizonte O en todos los puntos, salvo en el cultivo, donde la relación C/N es más baja (15.2) en comparación con la de las zonas de bosque. Por otra parte, la gran acumulación de COS y la mayor mineralización del N característica de los suelos ándicos, en relación con otros suelos minerales, explican también que las relaciones C/N sean mayores en aquellos suelos. Nanzzyo *et al.* (1993a) encontraron que la relación C/N de *Andosoles* cultivados (14.0) era mayor que la de otros suelos minerales en las mismas condiciones (11.0).

La distribución del C orgánico en los agregados muestra que la fracción más rica en C fue la de los agregados gruesos en el punto más alto (indicando una humificación ralentizada), mientras en los puntos más bajos los agregados finos son más ricos en C (indicando una mineralización acusada); no obstante, debido a los mayores porcentajes de agregados muy gruesos, este tipo de agregado es el que concentra el mayor porcentaje de C en todos los puntos, salvo en BO. De todas formas, alrededor del 30 % del COS se encuentra estabilizado en la fracción más fina de los agregados. Según aseguran Serrano *et al.* (2003) la materia orgánica contenida en partículas de tamaño inferior a 0.05 mm (agregados finos) que se integra en los minerales arcillosos del suelo formando el complejo organomineral, es más bioestable. En el caso de la toposecuencia, alrededor del 30 % del COS (como media) estará, por tanto, en formas poco susceptibles a la mineralización.

Los microorganismos también favorecen la formación estructural del suelo, siendo favorable, por tanto, una mayor actividad de los mismos. La emisión de CO_2 en muestras tomadas en época seca e incubadas durante tres días (respiración) dio como resultado un valor medio de $0.30 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$, siendo BA el punto donde se registró la mayor actividad y CA donde menos.

Tabla 3 - Propiedades de los suelos de la catena de Atécuaro (t: trazas).

INDICADORES EDAFICOS	Bosque degradado (BO)	Andosol cultivado (CA)	Zona quemada (QA)	Bosque degradado (BD)	Bosque no alterado (BA)
Dens. aparente (g/cm ³)	1.48	1.08	0.86	1.08	0.48
Agregados >0.2 mm (%)	21.7	40.5	44.8	50.1	42.2
Agregados 0.2-0.05 (%)	32.0	18.2	22.8	13.3	30.7
Agregados < 0.05 (%)	46.3	41.3	32.4	36.6	27.2
pH H ₂ O (1:2)	6.2	5.1	5.6	5.4	5.6
CIC (cmoles/kg)	37.1	28.9	30.0	23.9	52.9
PSB (%)	54.7	52.4	30.5	18.3	52.3
COS (mg/g)	95.1	53.2	72.2	64.3	160.0
N total (mg/g)	4.6	3.5	3.2	2.5	6.5
C/N	20.8	15.2	22.6	25.7	24.6
P Bray (mg/Kg)	t	5.29	t	t	t
C agreg gruesos (%)	18.1	34.5	42.7	44.0	40.5
C agreg medios (%)	31.8	18.8	22.6	14.2	33.7
C agreg finos (%)	50.2	46.7	34.7	41.8	25.8
Resp. (mg CO ₂ /g suelo d)	0.20	0.12	0.22	0.43	0.55

Conclusiones

En la toposecuencia del Tláloc la mayoría de los parámetros estudiados siguen una misma tendencia, salvo la Da, el pH y el CIC, que mostraron valores más o menos constantes a lo largo del transecto, lo que señala la existencia de unas propiedades inherentes comunes a los suelos de todo este área. Estos parámetros, por tanto, no pueden considerarse como buenos indicadores de la calidad del suelo en dicha toposecuencia. Por otra parte, la zona erosionada (TD) presentó los valores más bajos de P Bray, COS, N total y respiración basal, mientras que las zonas menos intervenidas por el hombre (PZ y PE) tuvieron los valores más altos de estos parámetros, es decir, tienen propiedades edáfica más favorables.

En Atécuaro, mientras que algunos parámetros (pH, C/N y P asimilable) mantuvieron valores más o menos constantes a lo largo de toda la toposecuencia (salvo en el área de cultivo), otros indicadores estudiados (COS y contenido de C en los agregados, PSB, CIC, Da y actividad microbiana) establecen diferencias entre los puntos, encontrándose las propiedades edáficas más favorables en el bosque no alterado sobre *Andosol*. Según se descende en altura se observan diferentes tipos de degradación del bosque, que ocasionan características edáficas indeseables respecto al bosque inalterado, sobre todo en el caso del área de cultivo. Se podría, por tanto, establecer que estos últimos indicadores sí son susceptibles al tipo de manejo de suelo. En la parte más baja el tipo de suelo cambia a *Oxisol*, el cual sostiene un bosque igualmente sometido a deforestación continua, pero este suelo es menos susceptible a la degradación por su mayor contenido en arcillas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Unión Europea la financiación de esta investigación a través del Proyecto *REVOLSO* (Programa *INCO*, European Contract n° ICA4-CT-2001-10052).

Bibliografía

- Astier, M., M. Maass y J.D. Etchevers.** 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sostenible. *Agrociencia*, **36**:605-620.
- Bauder, J.** 1999. When is organic matter built up or used up?. En la página WEB: <<http://www.montana.edu/wwwpb/ag/baudr178.html>>.
- Bray, R.H. y L.T. Kurtz.** 1945. Determination of total, organic, and available phosphorus in soil. *Soil Science* **59**:39-45.
- Covaleda, S., S. Pajares, J.F. Gallardo, J.D. Etchevers y J. Padilla.** 2004. Cambio de algunas propiedades químicas por efecto del manejo de cultivos en tepetates de Tlaxcala (México). Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Cartagena de Indias. Disco compacto.
- Doran, J.W. y T. B. Parkin.** 1994. Defining and Assesing Soil Quality. En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B. A. Stewart (eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Spec. Pub. N° 35. ASA y SSSA, Madison.
- Doran, J.W., M. Sarrantonio y M.A. Liebig.** 1996. Soil Health and Sustainability. *Advances in Agronomy*, **56**:1-54.
- Etchevers, J.D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin.** 2004. Tepetates of Mexico. *Encyclopedia of Soil Science*, Marcel Dekker, Boca Ratón.
- Hunnmayer, A.J., R. De Camino y S. Muller.** 1997. Análisis del Desarrollo Sostenible en Centroamérica. Indicadores para la Agricultura y los Recursos Naturales. IICA/GT, San José, Costa Rica.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris y G.E. Schuman.** 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am.*, **61**:4-10.
- Karlen, D.L., S.S. Andrews y J.W. Doran.** 2001. Soil Quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, **74**:1-40.
- Gallardo, J.F.** 2000. "Biogeochemistry of Mediterranean forest ecosystems: A case study". En: *Soil Biochemistry*, J.M. Bollag y G. Stotzky (ed.). *Marcel Dekker, New York*. **10**:423-460.
- Mabuhay, J.A., N. Nakagoshi e Y. Isasi.** 2004. Influence of erosion on soil microbial biomass, abundance and community diversity. *Land Degradation and Development*. **15**: 183-195.
- Moffat, A.J.** 2003. Indicators of soil quality for U.K. forestry. *Forestry*, **76**(5): 547-568.
- Murata, T., N. Nagaishi, R. Hamada, H. Tanaka, K. Sakagami y T. Kato.** 1998. Relationship between soil neutral sugar composition and the amount of labile soil organic matter in andisol treated with bark compost of leaf-litter. *Biology & Fertility of Soils*. **27**: 342-348.
- Nanzzyo, M., R. Dahlgren y S. Shoji.** 1993a. Chemical characteristics of volcanic ash soils. En: Shoji, S., M. Nanzzyo, R. Dahlgren (eds.). *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. ElSevier Science Publ.. Amsterdam. pp: 145-187.
- Nanzzyo, M., R. Dahlgren y S. Shoji.** 1993b. Physical characteristics of volcanic ash soils. En: Shoji, S., M. Nanzzyo, R. Dahlgren (eds.). *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. ElSevier Science Publ.. Amsterdam. pp: 189-207.
- Larson, W.E. y J.F. Pierce.** 1994. The dinamics of soil quality as a measure of sustainable management. En: *Defining soil quality for a sustainable environment*. En: Doran, J.W.,

- Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A., eds., Soil Sci. Soc. Am., Spec. Publ. 35, Madison. pp: 37-51.
- Pérez-Trejo, F.** 1994. Desertification and land degradation in the European Mediterranean. Eur 14850 Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.
- Rubio, M.** 1998. Dinámica del cambio de la cobertura y del uso de los suelos en la microcuenca de Atécuaro (Michoacán, México). Una perspectiva desde las Ciencias Ambientales. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo/*Universitat Autònoma* de Barcelona. Morelia, Michoacán.
- Santa Regina, I., M. Rapp, A. Martín y J.F. Gallardo.** 1997. "Nutrient release dynamics in decomposing leaf litter in two Mediterranean deciduous oak species". *Ann. Sci. For.*, **54**:747-760.
- Serrano, J.A., B. Ceccanti, G. Masciandaro, J.F. Gallardo, C. García-Izquierdo y A. Escalante.** 2003. Evaluación química estructural del complejo organo-mineral por encalado de suelos cafetaleros. *Agrochimica*. **47**:236-249.
- Singer, M. J. y S. Ewin.** 2000. Soil Quality. En: Sumner (ed.). Handbook of Soil Science. C.R.C. Press, Boca Raton, Florida. pp: 271-298.
- S. Q. I.** 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. Natural Resources Conservation, Service. Soil Quality Institute. Agricultural Research Service, U.S.D.A., Auburn (Alabama).
- Vergara, M.A.** 2003. Identificación y Selección de Indicadores de Calidad del Suelo y Sostenibilidad en Sistemas Naturales y Agrícolas de Laderas en Oaxaca. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo (Méjico).
- Wang, W. J., R.C. Dalal, P.W. Moody y J. Smith.** 2003. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biology & Biochemistry*. **35**: 273-284.
- Zunino, H., F. Borie, S. Aguilera, J.P. Martín y K. Haider.** 1982. Decomposition of ¹⁴C-labeled glucosa, plant and microbial products and phenols in volcanic ash-derived soils of Chile. *Soil Biology & Biochemistry*. **14**:37-43.